

**ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ
ТЕРМОРЕАКТИВНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СВЧ ОБРАБОТКЕ**

Г.А.Морозов¹, О.Г.Морозов¹, А.Р.Насыбуллин¹, Р.Р.Самигуллин¹, А.С.Шакиров¹
(¹ Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет
им.А.Н.Туполева-КАИ, shakirov_albert@mail.ru)

**OPTIMUM MODES OF MANUFACTURING OF PRODUCTS FROM THERMOSET
POLYMERIC MATERIALS AT THE MICROWAVEPROCESSING**

G.A.Morozov, O.G.Morozov, A.R.Nasybullin, R.R.Samigullin, A.S.Shakirov

Реализация СВЧ технологии изготовления изделий из ТПКМ отличается в первую очередь используемыми методами формования, что является следствием отличительных особенностей СВЧ нагрева. Заготовка изделия из ТПКМ укладывается в вакуумный мешок, изготовленный из высокотемпературного радиопоглощающего материала обладающей достаточной гибкостью и прочностью к различным механическим деформациям. Данный препег укладывается в формующую оснастку выполненного из материала с низкой теплопроводностью. Предлагаемый вариант позволяет использовать достоинства двух методов нагрева – конвективного и СВЧ-нагрева взаимно компенсируя недостатки друг друга.

В процессе эксперимента определен следующий порядок обеспечения оптимальных режимов работы экспериментального образца СВЧ установки осуществляющей изготовление изделий из ТПКМ:

1. Изготовление формующей оснастки;
2. Определение теплоемкости препега РПМ-ТПКМ-РПМ ($C_{\text{мат}}$). После чего рассчитывают требуемое количество энергии, необходимое для нагрева до требуемой температуры и поддержания требуемой температуры:

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = \mathcal{E}_n + \mathcal{E}_e \quad (1)$$

где \mathcal{E}_e - энергия необходимая для обеспечения этапа выдержки; \mathcal{E}_n - количество энергии, необходимое для нагрева препега от начальной температуры (как правило, комнатной $T_{\text{нач.}}$) до температуры при которой протекает реакция полимеризация $T_{\text{полимер.}}$:

$$\mathcal{E}_{\text{нагрев}} = (T_{\text{полимер.}} - T_{\text{нач.}}) / C_{\text{мат}} \quad (2)$$

Энергия необходимая для обеспечения выдержки равна:

$$\mathcal{E}_e = \mathcal{E}_{\text{плав.}} + \mathcal{E}_{\text{полимер.}} + \mathcal{E}_{\text{конв.}} \quad (3)$$

где $\mathcal{E}_{\text{плав.}}$, $\mathcal{E}_{\text{полимер.}}$ - скрытая теплота плавления и полимеризации для полимерного связующего, входящего в состав заготовки из ТПКМ; $\mathcal{E}_{\text{конв.}}$ - потери энергии за счет теплопроводности формующей оснастки:

$$\mathcal{E}_{\text{конв.}} = (\lambda_T \cdot S / l) \cdot (T_2 - T_1) \quad (4)$$

где λ_T - коэффициент теплопроводности материала формующей оснастки; S - общая площадь формующей оснастки; l - средняя толщина формующей оснастки; T_1 - температура на поверхности формующей оснастки; T_2 - температура на поверхности препега.

Тогда суммарная энергия, необходимая для изготовления изделия из ТПКМ равна:

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = \frac{(T_{\text{полимер.}} - T_{\text{нач.}})}{C_{\text{мат}}} + \mathcal{E}_{\text{плав.}} + \mathcal{E}_{\text{полимер.}} + \left(\frac{\lambda_T \cdot S}{l} \right) \cdot (T_2 - T_1) \quad (5)$$

3. Задаются временем необходимым для изготовления изделия из ТПКМ $t_{\text{изгот.}}$.
4. Определяют мощность, которую необходимо подвести к препегу:

$$P_{\text{препег}} = \frac{\mathcal{E}_{\Sigma}}{t_{\text{изгот.}}} \quad (6)$$

5. Определяют падающую (выходную) мощность генератора:

$$P_{\text{ген.}} = \frac{P_{\text{препрег}}}{(1 - |\Gamma|^2)} \quad (7)$$

где Γ - среднее значение коэффициента отражения от входа в камеру обработки за время работы. Поскольку в процессе изготовления свойства ТПКМ меняются, соответственно изменяется и коэффициент отражения. В данном случае рекомендуется данную величину принять равной 0,4 (КСВ=2,333).

6. Далее осуществляют регулировку КСВ на входе в камеру обработки. Настройку осуществляют перед началом обработки при наличии в камере препрега и формирующей оснастки путем подбора положения регулирующих винтов расположенных на секции согласования. Регулировка считается выполненной, если КСВ в рабочем диапазоне частот не превышает значение равном 2.

В процессе функционирования экспериментального образца СВЧ установки, осуществляющей изготовление изделий из ТПКМ рекомендуется контролировать температуру препрега, неравномерность нагрева препрега и коэффициент стоячей волны. Результаты работы на экспериментальном образце СВЧ установки показывают корреляцию реализуемого этапа и указанных параметров. Типичный результат для рекомендуемого варианта препрега показан в таблице 1.

Таблица 1.

Контролируемый параметр		Значение контролируемого параметра на этапах			
		Нагрев до плавления	Выдержка-плавление	Нагрев до полимеризации	Выдержка для полимеризации
Тем-ра препрега	В Начале этапа	22	72	86	113
	В конце этапа	72	86	113	130
Неравномерность нагрева препрега		±0	±6	±8	±1,5
КСВ		Возрастание от 3 до 3.6	Снижение от 3.6 до 2.9	Возрастание от 2.9 до 3.2	3.2 (без изменений)

Из этих данных видно, что температурные режимы при осуществлении реализации СВЧ технологии изготовления изделий из ТПКМ остаются такими-же и зависят только от свойств используемых материалов, подвергаемых обработке. При этом важно отметить, что начало и окончание различных этапов связано не только с температурой процесса, но и с неравномерностью нагрева и характером КСВ. Это дает дополнительные возможности по управлению неравномерностью и мощностью генератора, а именно:

1. На начальном этапе нагрева до плавления установить падающую (выходную) мощность генератора на максимальное значение;
2. На втором этапе выдержка при плавлении падающую (выходную) мощность генератора установить на уровне 83-85% от максимального возможного значения.
3. На этапе нагрева до полимеризации установить падающую (выходную) мощность генератора на уровне 90% от максимально возможного значения.
4. На этапе выдержка при плавлении падающую (выходную) мощность генератора плавно снижать до уровня 60% от максимального возможного значения со скоростью 2% в минуту.

Данные рекомендации позволяют обеспечить сокращение затрат энергии на обработку и изготовление изделий из ТПКМ.